

課題番号	Q17T-01
課題名（和文）	長い円管内面への微細パターン形成技術の研究
課題名（英文）	Research on printing of fine patterns onto inner surfaces of long cylindrical pipes
研究代表者	工学部 先端機械工学科 研究員 堀内敏行
共同研究者	工学部 機械工学科 先端機械コース 学生 秋谷甲輔
	工学部 機械工学科 先端機械コース 学生 今橋拓巳
	大学院工学研究科 機械工学専攻 学生 伊藤海樹
	大学院工学研究科 機械工学専攻 学生 高橋宏志
	工学部 先端機械工学科 研究員 岩崎順哉
	大学院工学研究科 機械工学専攻 学生 鈴木佑太
	工学部 先端機械工学科 教授 柳田 明
	工学部 先端機械工学科 准教授 小林宏史

研究成果の概要（和文）

内径 10mm、長さ 300mm の不透明円管内面に線幅 300 μ m の微細パターンを任意に形成するための仕組みを考えた。直径 500 μ m の光ファイバの先端部 30mm を正方形化して 10 本を 1 列に並べたマトリックスを作り、テーパコンデュイトという光像縮小光学素子と、レンズ、ミラーを組み合わせで管内面に 300 μ m のパターンを投影露光する。光ファイバ毎に発光ダイオードで露光光を供給し、投影光学系全体を管内に入れ、長さ 300mm、全周を走査露光する。実現を図るため、パターンを形成する光学系の主要部を製作した。そして、実験により 300 μ m の基本パターンが形成できることを実証し、目標とする装置を実現できる見通しを得た。

研究成果の概要（英文）

Optics and mechanisms for printing patterns on inner surface of a long pipe with an inner diameter of 10 mm and a length of 300 mm was designed. A linear optical fiber array composed of 10 fibers with 500 μ m square ends and a taper conduit to reduce the light image size were applied, and 300 μ m patterns were projected on the inner surface of the pipe. Exposure light was supplied to each fiber from LEDs. Patterns are printable by scanning the pipe in vertical and rotational directions. To realize the actual system, an experimental exposure system was handmade, and it was clarified that the new scheme was feasible.

1. 研究開始当初の背景

約 10 年前に内径 2mm 以下の小径金属管の内面に波長 405nm の半導体レーザ光の走査により任意パターンを形成するための露光装置を自作開発し、管の入り口から深さ 15~20mm 程度の内面に線幅 20~30 μ m のレジスト(感光性樹脂)パターンが形成できるようにした。そして、内面に溝を持つ小径空気軸受けや、多重螺線を密に配置して内面に細かいひだを付けたヒートパイプ部品などを製作した。その後、研究のさらなる応用や新たな露光装置開発のニーズを探していたところ、内径 20mm 程度以下で 300mm 程度の長さの管内面に線幅 300-500 μ m の任意のパターンを形成したいとのニーズに出会った。上記の寸法の管や穴の内面に微細パターンを形成する手段は機械加工しかなく、螺線溝や直線溝以外の複雑な形状は加工困難である。管材の内面にリソグラフィによって任意の微細パターンを形成する技術は、世界中を見ても本学以外からの報告はなく、もちろん露光装置は市販されていないので、独創的で世の中の役に立つ研究課題と考えた。

2. 研究の目的

簡便安価な円管内面露光装置を自作開発し、内径 10mm、管長 300mm の金属管やガラス管の内面に、寸法 300 μ m の微細パターンを形成する技術を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

図 1 に内面露光装置の構想を示す。直径 500 μ m のプラスチック光ファイバ 10 本の先端 30mm 程度を正方形化するとともに一列アレイに一体成型する。そして、1 本ずつに発光ダイオード(LED)を光源として露光光線を供給し、管内に挿入する。正方形化光ファイバアレイ射出口にテーパコンデュイットという縮小光学素子を置いて、正方形化光ファイバアレイの縮小光像をテーパコンデュイット出口側に作り、その像をレンズとミラーで管の内面上に作る。光ファイバと投影露光光学

系は中空のガイドユニット内に収納して上下動スライダに取り付け、鉛直方向に走査する。テーパコンデュイットは、密接細径光ファイバを束ねて加熱して引き伸ばし、テーパ状に小径化した部品である。内面にレジスト(感光性樹脂)を塗布した内径 10mm、長さ 300mm の試料円管は、水平面内回転ステージ上に鉛直に保持し、上下動スライダによる露光光学系入りガイドユニットの鉛直方向上下動と管の軸周りの回転動を組み合わせることで管内面の全域を露光する。点灯する光源 LED の指定と露光場所との関係をプログラミングすることにより、管内面に任意の微細パターンを自動的に露光できるようにする。

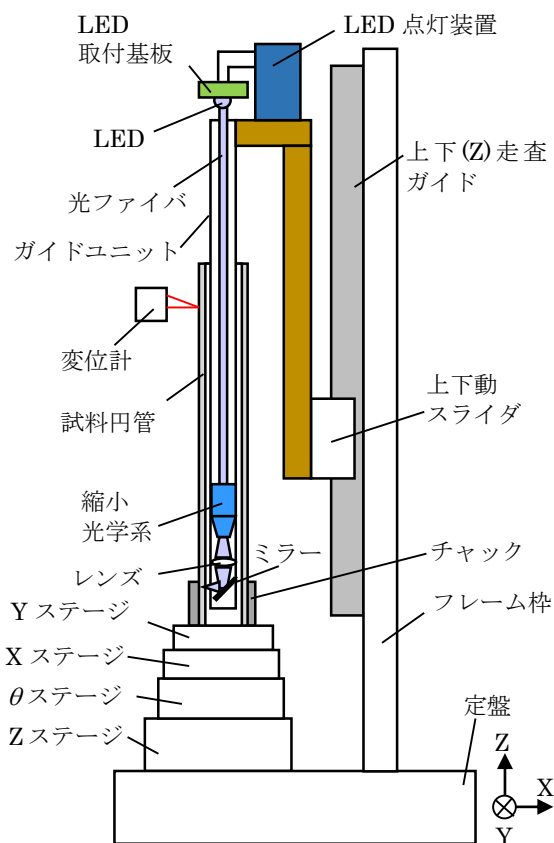


図 1 内面露光装置の構想

4. 研究成果

目標の露光装置を開発するため、主要部を検討する図 2 に示す実験用露光装置を自作した。定盤上にアングルを組み、鉛直(Z)方向にストローク 500mm でスライダを動かす走査機構を取り付けた。露光光源には、高出力発光ダイオード(LED)

(NVSU233A(T)-D1 日亜化学工業株式会社)を用いた。波長は 405nm である。

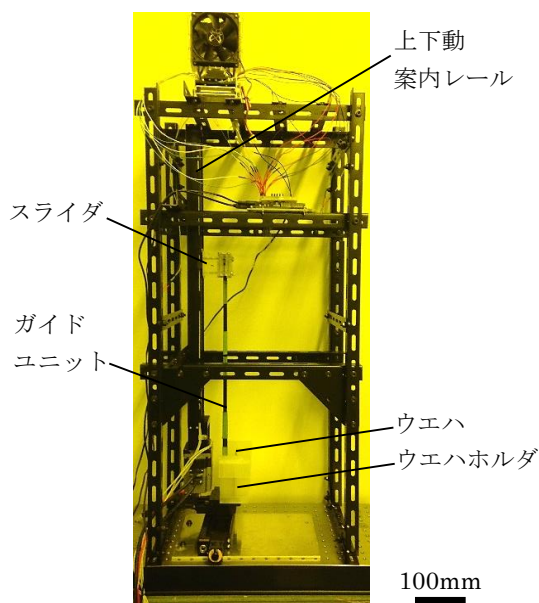


図 2 自作した露光実験装置

ファイバを密接させるため先端を正方形化するには、低温で成形できるプラスチック光ファイバ(三菱レイヨン、エスカ CK-20)を使用することが必要であった。また、正方形化を精度良く行うには、ファイバ径を $500\mu\text{m}$ 以上としなければならなかった。したがって、 $500\mu\text{m}$ 角を $300\mu\text{m}$ 角に縮小することが必要であった。しかし、プラスチック光ファイバは開口数が 0.5 と大きく、射出光が広い角度に広がった一方、管内径より小さい光学系部品しか使えないことから、光エネルギーの損失を抑えるには、光学系部品を光ファイバ射出口からあまり離れない位置に配置することが必要であった。幸いにして、テーパコンデュイットの使用を思い付いたことで、簡単かつコンパクトに必要な縮小率の光学系を組むことができた。

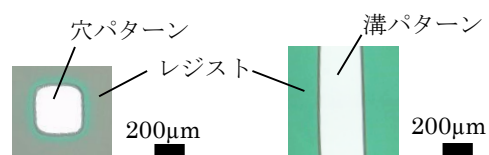
先端を正方形化した光ファイバアレイの製作については、正方形化する際の加熱条件を検討し、加熱温度を低温から高温に少しずつ上げて段階的に加熱冷却を繰り返す方法を開発した。これにより、10 本のファイバアレイを縦寸法 $479\pm 4\mu\text{m}$ 、横寸法 $490\pm 1\mu\text{m}$ の精度で製作できた。

テーパコンデュイットの小径/大径比は 0.445

であり、レンズとミラーによる投影光学系の倍率が 1.25 なので、総合倍率は 0.56 となった。

製作した上記の露光光学系を長さ 400mm の黒色樹脂製ガイドユニット内に固定し、鉛直に保持してストローク 500mm で上下動可能なスライダに取り付け、管内に挿入できるようにした。しかしながら、まずは、設計製作した露光光学系により目標とするパターンを形成できるかどうかを確認することが必要である。そのため、試料円管を保持するステージを XY ステージのみの簡単な構成とし、その上にウエハを載置したり、ウエハホルダにウエハを入れて鉛直に保持したりできるようにした。

まず、ガイドユニット先端の 45° ミラーをはずしてパターンが水平に保持したウエハ上に転写されるようにした。そして、LED1 個とファイバ 1 本のみを用いて正方形ホールパターンを形成した。その結果、角が丸みを帯びるものの、2s 以下の露光時間で形成できた(図 3 (a))。次に、ガイドユニット先端の 45° ミラーを戻して露光光線が水平方向に射出される本来の構成として、ウエハホルダのスロットにウエハを鉛直に保持し、ガイドユニットを鉛直方向に直線走査した。その結果、線幅 $300\mu\text{m}$ のスペースパターンが滑らかに形成された(図 3 (b))。実験を通して新たに考案した内面露光光学系が有効に働くことが分かり、内面リソグラフィに適用可能な見通しを得た。



(a) 形成した穴パターン (b) 形成した溝パターン

図 3 パターン形成結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ① Kaiki Ito, Yuta Suzuki, Toshiyuki Horiuchi:
Fabrication of cylindrical micro-parts using
synchronous rotary scan-projection

- lithography and chemical etching, Proceedings of SPIE, Vol. 10451, 104510G, 2017.
- ② Hiroshi Takahashi, Toshiyuki Horiuchi: Laser-scan lithography and electrolytic etching for fabricating mesh structures on stainless-steel pipes 100 μm in diameter, Proceedings of SPIE, Vol. 10451, 104511I, 2017.
- ③ Hiroshi Takahashi and Toshiyuki Horiuchi: Laser-Scan Lithography and Electrolytic Etching for Fabricating Meshed Pipes of Stainless Steel, Journal of Photopolymer Science and Technology, Vol. 31, No. 1, pp. 51-57, 2018.
- ④ Toshiyuki Horiuchi, Kousuke Akitani, Kazumi Imahashi, Yuta Suzuki, Jun-ya Iwasaki, Hiroshi Kobayashi, and Akira Yanagida: Design and investigation of a maskless lithography system for printing patterns on the inside surface of a long pipe, Proceedings of SPIE, submitted to SPIE, 2019.
- [学会発表] (計 10 件)
- ① 高橋宏志, 堀内敏行: レーザ走査露光と電解エッチングによる外径 100 μm ステンレス管への微細加工, 応用物理学会 次世代リソグラフィ技術研究会 次世代リソグラフィワークショップ予稿集, pp. 69-70, 2017.
- ② 伊藤海樹, 鈴木佑汰, 堀内敏行: 同期走査投影露光と化学エッチングによる医療用ステントの製作, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 5p-S42-1, 2017.
- ③ 高橋宏志, 堀内敏行: 電解エッチングの均一化による外径 100 μm 極微細スリット多孔管の作成, 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 69-70, 2017.
- ④ 堀内敏行, 岩崎順哉, 渡辺潤, 鈴木佑太: マトリックス投影露光用先端正方形化光ファイバ直線アレイの製作, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 20a-B401-1, 06-050, 2018.
- ⑤ 堀内敏行, 秋谷甲輔, 今橋和巳, 岩崎順哉, 鈴木佑汰, 小林宏史, 柳田明: 管内面露光装置の構想と基礎検討, 電気学会研究会資料, 光応用・視覚研究会 LAV-18-17, 15-18, 2018.
- ⑥ 堀内敏行, 高橋宏志, 小林宏史, 柳田明: 外径 100 μm のステンレス管への密接交互配置貫通スリット群の微細加工, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 19p-234A-2, 06-002, 2018.
- ⑦ Toshiyuki Horiuchi, and Hiroshi Takahashi: Precise Lithography and Etching on Hairline Needle Pipes of Stainless Steel, Abstract Book, BIT's 8th Annual World Congress of Nano Science and Technology-2018, 156, Potsdam, Germany, 2018.
- ⑧ 堀内敏行, 高橋宏志, 小林宏史, 柳田明: リソグラフィとウェットエッチングによる細径ステンレス管への密接スリットアレイの形成, 電気学会研究会資料, 光応用・視覚研究会 LAV-18-019, 5-9, 2018.
- ⑨ T. Horiuchi, K. Ito, H. Kobayashi, A. Yanagida: Investigation on stainless-steel stents fabricated using projection lithography and wet etching, EBS 2019, 2nd European Biosensor Symposium, Florence, Italy, 2019.
- ⑩ Toshiyuki Horiuchi, Kousuke Akitani, Kazumi Imahashi, Yuta Suzuki, Jun-ya Iwasaki, Hiroshi Kobayashi, and Akira Yanagida: Basic Design and Investigation of a Lithography System for Printing Patterns on the Inside Surface of a Long Pipe, Photomask Japan 2019, The 26th Symposium on Photomask and NGL Mask Technology, p. 3, 2019.